Баскина, О.А. Богатиков и др. – М.: Наука, 1985. – 367 с.

УДК 550.831.05(571.1)

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СИММЕТРИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.Н. Устинова, И.Г. Устинова

Томский государственный университет
E-mail: ustinova@ggf.tsu.ru

В строении и иерархической согласованности дискретных геолого-геофизических объектов выявляется определённая закономерность и упорядоченность в их размерах. Она обнаруживается в форме структур, в их пространственном расположении и временном следовании. Повторяемость форм проявляется и достаточно легко типизируется в морфологии поверхностей и морфологических сочетаниях геофизических полей. Математическая идентификация типового облика структур эффективно выполняется с использованием автокорреляционного анализа и фильтров Винера.

Геолого-геофизические объекты на любом из изучаемых уровней организации есть система систем и могут рассматриваться как упорядоченное множество дискретных элементов [1–3]. Любая геолого-геофизическая моносистема представима как двух, трёх и более компонентная с эмерджентными свойствами. В вертикальном разрезе дискретность и вложенность геолого-геофизических систем обнаруживается в наличии разнопорядковых циклитов [4]. На поверхности земных оболочек она проявляется в мозаичной, но закономерно построенной совокупности геологических объектов [5]. Дискретность оболочечных объектов имеет прямоугольную симметрию [6, 7], которая осуществляется через систему ортогональных трещин; либо – квазиконцентрическую [8, 9], связанную со структурами центрального типа. Прямоугольные и концентрические блоки структурно согласованы и являются составными частями дискретно-иерархической [10] блоковой системы.

Вещественно-структурные комплексы осадочных нефтегазоносных бассейнов, формирующиеся в длительной истории геологического развития, имеют ряд устойчивых форм пространственно-морфологического проявления, в близких морфологических конфигурациях обнаруживаются в геофизических полях. Типовые морфологические сочетания в нефтяной геофизике достаточно надёжно выявляются в палеоповерхностях, строящихся по сейсмическим данным, картах геофизических параметров (структурные карты, карты энергий отражений и др.).

Устойчивые морфологические типы рельефа и потенциальных полей характеризуются: кольцевым; вихревым; спиральным; симметрично-сигмоидным [11] (взаимодополняемым по положительным и отрицательным формам); двух-, трёх-, четырёх-, семилучевым сочленением [5] и т.д. основных элементов морфологии.

Для выявления и истолкования аномалий центрально-зонального типа могут использоваться различные методы. Среди них, в силу наличия типических сочетаний аномальных проявлений, наиболее эффективны вероятностно-статистические методы, методы классификации и др.

В рамках эргодичной и стационарной модели анализируемого поля (будь то геофизическое поле или рельеф поверхности) важные сведения о свойствах аномалий можно получить по автокорреляционной функции (АКФ), энергетическому спектру, математическому ожиданию. Наиболее информативными для оценки свойств составляющих потенциальных полей и полей сейсмических параметров являются функция автокорреляции и энергетический спектр. Среди параметров автокорреляционной функции, характеризующих форму и поперечные размеры изучаемых объектов, выделяются дисперсия, радиус нулевой корреляции [12] и др. Радиус нулевой корреляции даёт представление о скорости спада АКФ.

Для разнотипных геологических и геофизических объектов двумерные оценки функции автокорреляции

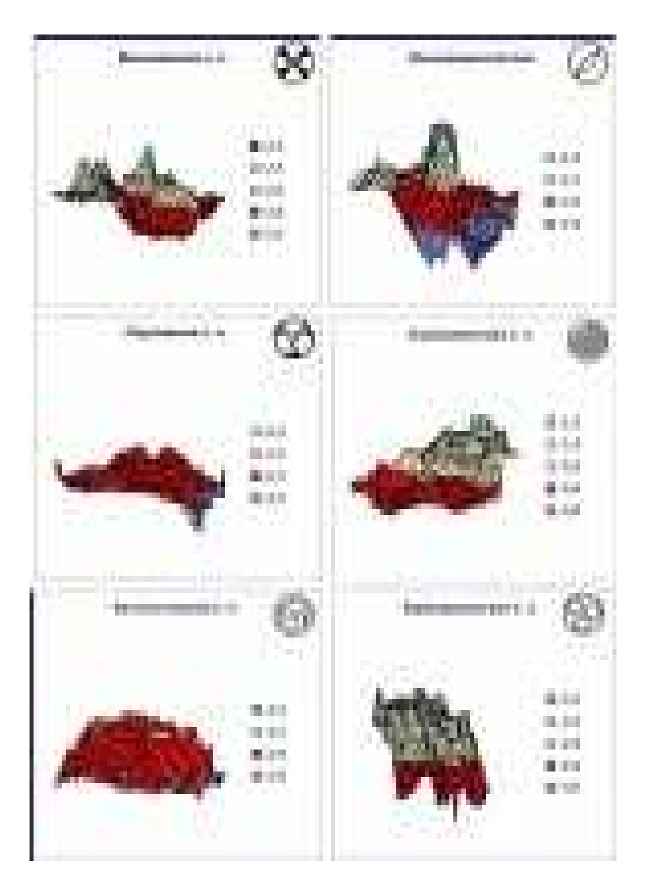


Рис. 1. Аксонометрические изображения для структур второго порядка по горизонту II_a юго-восточной части Западно-Сибирской плиты

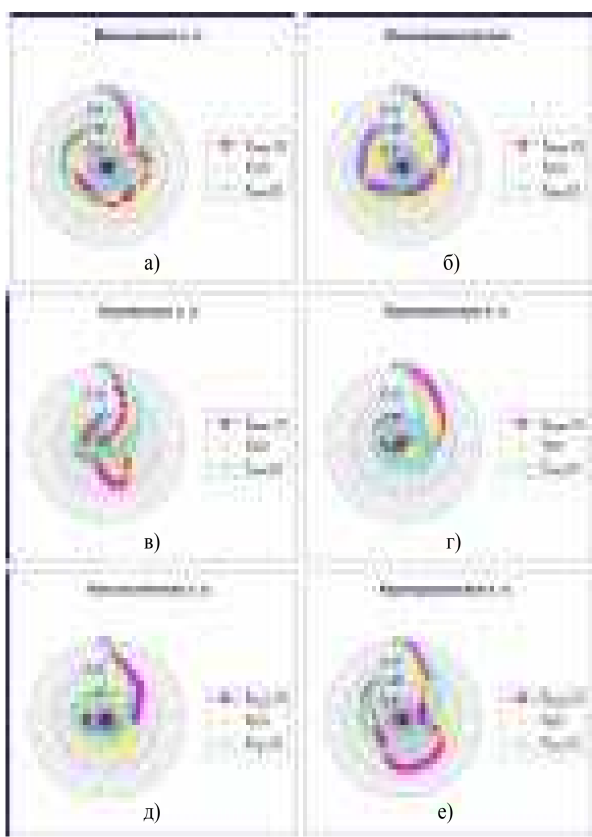


Рис. 2. Функции автокорреляции, построенные вдоль окружностей различных радиусов для структурных поверхностей верхнеюрских отложений территории исследований

могут служить критерием обнаружения их на структурных планах и в геофизических полях [12]. Оценка функций автокорреляции для морфологических объектов различного типа, по причине трехмерности объектов и ограниченности пространственных реализаций, представляет некоторые трудности.

Пусть $Y(\tau)$ – стационарный случайный процесс с математическим ожиданием $M[Y(\tau)] = m$, дисперсией $D[Y(\tau)] = \sigma^2$ и функцией автокорреляции

$$\rho(\tau_j - \tau_i) = \frac{M[(Y(\tau_j) - m)(Y(\tau_i) - m)]}{\sigma^2},$$

где t – моменты измерений (либо точки измерений), а изучаемый процесс $Y(\tau)$ наблюдается на отрезке от 0 и T. Результатами наблюдений являются величины $Y_i = Y(\tau_i),\ i = \overline{1, N}$, для которых необходимо построить оценку $\hat{R}(\tau)$ функции автокорреляции $\rho(\tau)$ на отрезке значений [0,T] аргумента τ. Так как наблюдения Y_i (для структурных поверхностей, геофизических полей), зачастую, являются функцией двух независимых аргументов x,y, при оценке двумерной функции автокорреляции и создании эффективных расчётных схем приходится делать некоторые упрощения.

Из обобщения теоремы Биркгофа-Хинчина [13] для эргодических процессов (среднее по совокупности реализаций совпадает с математическим ожиданием и процесс имеет конечную дисперсию) следует возможность оценивания корреляционной функции по единственной реализации процесса. Вычисление функции автокорреляции по контуру геометрической фигуры (накладываемой на площадную реализацию анализируемого поля), по форме близкой к натурным объектам (окружности, спирали Архимеда, розе Гвидо Гранди и др.), позволяет несколько упростить расчётные схемы и уменьшить их влияние на результаты оценивания.

Если изучаемый процесс $Y(\tau)$ наблюдается на отрезке от 0 до T, где $T = 2\pi\rho$, r – радиус окружности, вдоль которой ведутся наблюдения, окружность радиуса r можно задать параметрическими уравнениями

$$\begin{cases} \xi = \rho\cos\tau \\ \psi = \rho\sin\tau \end{cases}.$$

Наблюдения Y_i в этом случае становятся функцией одного независимого переменного t и для оценки автокорреляционной функции можно воспользоваться известной формулой [12]

$$\hat{R}(\tau) = \frac{\frac{1}{N-\tau}\sum_{i=1}^{N-\tau}\left[U(t_i) - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}U(t_i)\right]\left[U(t_{i+\tau}) - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}U(t_i)\right]}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[U(t_i) - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}U(t_i)\right]^2}.$$

Для типизации форм структур и аномалий потенциальных полей авторы прибегли к расчёту функций автокорреляции по функционально заданным направлениям. АКФ, вычисленные для нескольких типов палеоповерхностей (рис. 1), с использованием окружности, спирали

Архимеда и роз Гвидо Гранди и др. показали эффективность такого подхода. Типичные формы рельефа являются устойчивыми морфологическими проявлениями, присутствуют в каждой структуре. Однако в рельефе (в морфологии поверхности или в геофизическом поле), зачастую, достаточно контрастно проявляется один или два преобладающих типа. Универсальность строения структур обнаруживается также в том, что типические образы имеют центрально-зональную симметрию. Симметрия имеет место, как в центральном сочетании («наложении») типовых форм, так и в их центрально-периферическом следовании. Например, в лучевых типах выявляется нарастание от центра на периферию структуры количества лучевых элементов [14].

Некоторые оценки автокорреляционных функций, рассчитанные по окружностям разных радиусов, представлены на рис. 2. Расчёты позволили выявить возможность максимального приближения автокорреляционной функции к типовой форме.

Структурные карты куполовидных поднятий (к.п.) построены в интервале глубин 2…3 км, с сечением 0,2 км, в кружках – геометрические образы типовых форм рельефа в плане палеоповерхности – в случае совпадения геометрического образа поверхности и геометрической фигуры, по которой выполняется расчёт АКФ (рис. 2, г, е). Преобладающий тип палеоповерхности наглядно проявляется в АКФ (рис. 2, а, б, в). В оценках функции автокорреляции обнаруживается центрально-периферическая изменчивость формы поднятия, с нарастанием (от свода к обрамлению) изрезанности структуры (рис. 2, а, д).

Полученные при типизации функции автокорреляции, в свою очередь, несут информацию о пространственных свойствах геофизических объектов, могут использоваться для фильтрации трёхмерных полей. Для случайного геолого-геофизического поля автокорреляционная функция согласно обратному преобразованию Фурье представима интегралом

$$R[\xi,\psi] = \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda,\mu)\, e^{i(\lambda\xi+\mu\psi)}\, d\lambda\, d\mu,$$

где функция $S(\lambda,\mu)$ – спектр мощности с пространственными частотами λ, μ. Спектр мощности, в свою очередь, может быть рассчитан из исходной функции с использованием преобразования Фурье, то есть

$$S(\lambda,\mu) = \frac{1}{(2\pi)^2}\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} R(\xi,\psi)\, e^{-i(\lambda\xi+\mu\psi)}\, d\xi\, d\psi.$$

Сделав замену переменных, x = r cos φ, y = r sin φ, λ=ω cos ψ, μ = ω sin ψ, в соответствии с требованиями полярной системы координат, где r, ω и ψ, φ– радиусы, частоты и углы наклона полярных осей, получим

$$S(\lambda,\mu) = \frac{1}{(2\pi)^2}\int\limits_0^{\infty} R(r)\, r\, dr \int\limits_0^{2\pi} e^{-ir\omega(\cos\varphi\cos\psi+\sin\varphi\sin\psi)}\, d\varphi$$

$$S(\lambda,\mu) = \frac{1}{(2\pi)^2}\int\limits_0^{\infty} R(r)\, r\, dr \int\limits_{-\pi}^{\pi} e^{-ir\omega\cos(\varphi-\psi)}\, d\varphi$$

Так как внутренний интеграл представляет собой $2\pi J_0(r\omega)$, где $J_0(r\omega)$ – функция Бесселя нулевого порядка, согласно преобразованию Ханкеля [15]

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int\limits_0^{\infty} R(r)\, J_0(r\omega)\, r\, dr.$$

Увеличивая размерность пространства и применяя аналогичные рассуждения можно получить спектр мощности в любом заданном пространстве R_N [16]

$$S_N(\omega) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}}\int\limits_0^{\infty} J_{\frac{N-2}{2}}(\omega r)\, \frac{r^{N-1}R(r)}{[\omega r]^{\frac{N-2}{2}}}\, dr, \quad N \geq 1,$$

где J_m – функция Бесселя порядка m, $R(r)$ – размерность координатного пространства равновлияющих на исследуемое поле неоднородностей.

В выражении (1), известном как преобразование Винера-Хинчина, верхний предел интегрирования бесконечный, однако, при анализе геофизических полей мы имеем дело с конечными реализациями. Для получения наилучшего приближения $S_N(\omega)$ интегралом (1) в конечных пределах размер реализации L необходимо выбирать больше интервала существенных изменений подынтегральной функции. При задании величины L, $S_N(\omega)$ будет определена тем точнее, чем быстрее с ростом τ убывает подынтегральная функция. Для достижения настоящего требования, с учетом вида осциллирующего характера ядер $\frac{J_m(\omega r)}{(\omega r)^m}$, при различных N, необходимо выполнение следующего условия [17]

$$R(r) \sim \frac{1}{r^{\delta}} \quad (1)$$

$\delta > 0$ при $N = 1$, $\delta \geq \frac{1}{2}$ при $N = 2$, $\delta > 1$ при $N = 3$, т.е. для достоверности расчетов достаточно, чтобы $R(r)$ случайного поля большей размерности затухала быстрее. При несоблюдении условия (2) появляются отрицательные значения $S_N(\omega)$, не имеющие физического смысла. Очевидно, если в предположении о $S_N(\omega)$, где $N < M$ – реальной размерности, рассчитывать то в этом случае $R_M(r)$ должна удовлетворять условию (2), и по спектру Винера может быть получена информация о пространственных свойствах объектов исследования. Отсюда следует критерий определения истинной размерности случайного поля: действительная размерность M поля равна максимальной $S_N(\omega)$ не в (1), при которой вычисленные значения $S_N(\omega)$ еще положительны [17, 18]. Таким образом, форму объекта можно оценить по параметру M и радиусу нулевой корреляции r_0 [19].

Настоящий критерий «знака» информативен в случае, когда мы имеем дело с реализацией поля конкретной размерности, но на геофизические поля оказывают влияние объекты с различными пространственными (2) свойствами, на практике наиболее вероятны комбинации полей ^{M} в пространстве R_N. Так, в АКФ проявляется преобладающая форма объекта, его латеральная и пространственно-зональная изменчивость, пространственное строение, которые могут анализироваться, в том числе, через оценки спектра.

Спектр мощности S_K (ω) является информативным

параметром, характеризующим как энергетический состав поля, так и частотный. В силу наличия для типовых форм структур собственной формы функции автокорреляции, для каждой из них свойственна функция Бесселя, наилучшим образом аппроксимирующая АКФ при расчёте энергетического спектра S_K (ω).

Оценка пространственного типа структуры (геофизического поля) также может быть выполнена по критерию «максимума энергии». Максимальные амплитуды энергетического спектра должны соответствовать (щ), наилучшим образом аппроксимирующей АКФ конкретного типа аномального поля. Для каждой из типовых форм (рельефа, геофизического поля) получен свой индивидуальный спектр мощности, характеризующийся функцией Бесселя определённого порядка m с максимальной интенсивностью значений спектра в конкретном диапазоне пространственных частот и собственной величиной t_0 (второй нуль автокорреляционной функции).

Различие в спектрах мощностей для типовых структур геолого-геофизических полей, характеризующих морфологические особенности структур центрального типа, позволяет использовать величину энергии E, рассчитанную для соответствующей структуры поля при заданных параметрах m и частоте ω, для оценки типа геолого-геофизического объекта. Расчёт энергии можно осуществлять в скользящем окне по профилю, либо по системе радиальных профилей. По результатам расчётов оценивается полная энергия реализаций конкретных аномалий в их контуре. Для повышения точности оценок анализируемые профильные, либо площадные реализации перед расчётом преобразуются в аномальный процесс, путём как минимум десятикратного повторения реализаций.

Типизация в рамках данного подхода АКФ по профильным реализациям поля и по площади, аппроксимация ее в частотной области отрезками рядов Фурье-Бесселя позволили построить для разделения геофизических полей ряд фильтров. В общем случае отклик линейного фильтра f(x,y) на исходную функцию u(x,y) равен двухмерной свертке [16].

Учитывая радиальную симметрию исходного поля, с помощью Фурье-Бесселя образов функции на входе u(r) и передаточной характеристики фильтра h(r), функция на выходе

$$\phi(\rho) = \upsilon(\rho) * \eta(\rho),$$

поскольку

$$\upsilon(щ) \xrightarrow{\aleph} \Sigma(\quad \eta(щ) \xrightarrow{\aleph} \Omega$$

$$\phi(щ) \xrightarrow{\aleph} \Phi($$

$$\Phi(щ) = \Omega(щ) \cdot \Sigma(щ),$$

где $щ = \sqrt{щ_x^2 + щ_y^2}$, $\rho = \sqrt{\xi^2 + \psi^2}$, где $щ_x, щ_y$ проекции ω на соответствующие оси координат, $\aleph$ – преобразование Винера-Хинчина.

Как показали исследования, оптимальные в среднеквадратическом смысле винеровские фильтры часто далеки от фильтров действительно оптимальных для подавления аддитивной помехи, а иногда могут даже ухудшить картину восстанавливаемого поля [20]. Объясняется это, во-первых, тем, что пс и п (АКФ полезного сигнала и помехи) не достаточны для описания статистических отличий помехи от полезного сигнала, во-вторых, среднеквадратический критерий неполно описывает действие помехи и, в-третьих, такая фильтрация основывается на непростой задаче определения пс и п прямо из исследуемого поля [17]. В связи с этим более надежным критерием оптимальности является максимизация отношения энергий сигнала и помехи путем эмпирического анализа их энергоемкости во всей полосе анализируемых частот при разных гипотезах об $\aleph$.

Таким образом, учитывая оценки параметров идеальных фильтров, при гипотезе об $\aleph = 1$, весовая функция идеального ... фильтра

$$\eta(\rho) = 2 \quad (2\rho щ_1)^{\frac{1}{2}}, \quad \rho$$

$щ < щ < щ$; весовая функция ... фильтра, при $\aleph = 2$ – $\eta(\rho) = (2\rho щ_0$, $\rho)$ · $щ_0 < щ < щ$; весовая функция идеального низкочастотного фильтра, при

$\aleph = 3$ – $\eta(\rho) = 2 \left(\frac{\rho}{щ} (2\rho щ_1) \right)^{\frac{1}{2}}$ ρ [21], $щ_m < щ < щ_n$,

где $щ_0$, $щ_p$, $щ_m$, $щ_n$, щ, щ – полосы частот максимальной энергоемкости полезной составляющей, ρ, з, μ, ν – граничные индексы интервалов частот. Для фильтрации в волновом поле конкретного объекта (согласно проведённому автокорреляционному анализу) функция Бесселя может быть заменена на АКФ типового объекта. Качество выполненной фильтрации, с использованием фильтра Винера, определяется среднеквадратической погрешностью на выходе фильтра, возникающей за счёт неточного задания автокорреляционной функции; коррелируемостью поискового объекта и других составляющих геолого-геофизических объектов, геометрические образы которых в той или иной мере всегда присутствуют в изучаемом поле; погрешностью оценки энергетического спектра и др. Основной трудностью при выполнении фильтрации является то, что исходные реализации имеют конечные размеры.

Так, разработанные для создания и фильтрации голографических образов алгоритмы [16–18], могут найти применение при анализе и обработке сейсмических данных, построении трёхмерных моделей сейсмогеологических полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Ю.Н. Цикл как основа мироздания. – Ставрополь: Ставропольское книжное издательство, 1990. – 108 с.
2. Годзевич Б.Л. Проторешётка и цикличность // Циклы: Матер. I Междунар. конф. – Ставрополь: Изд-во Сев.-Кавк. ГТУ, 1999. – Т. 2. – С. 95–97.
3. Аплонов С.В., Лебедев Б.А. Порядок, хаос и эволюция в геологической истории Земли // Геофизика. – 2001. – № 3. – С. 56–62.
4. Вылцан И.А. Введение в учение о фациях и формациях. – Томск: ТГУ, 1990. – Ч. II. – 207 с.
5. Устинова В.Н. Кольцевая зональность и цикличес-

кое строение нефтегазоносных комплексов Западной Сибири // Циклы: Матер. II Междунар. конф. – Ставрополь: Изд-во Сев.-Кавк. ГТУ, 2000. – С. 38–40.
6. Шульц С.С. Планетарная трещиноватость. – М.: Недра, 1973. – 213 с.
7. Гарбар Д.И. Регмагенез древних платформ // Общая и региональная геология, геологическое картирование. Обзор ВИЭМС. – М., 1991. – 45 с.
8. Соловьёв В.В. Структуры центрального типа территории СССР по геолого-геоморфологическим данным. – Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. – 110 с.
9. Глуховский М.З., Павловский Е.В. Кольцевые структуры ранних стадий развития Земли. Сравнительная планетология // Доклады XXVII Междунар. геол. конгр. – М.: Изд-во Ин-та литосферы АН СССР, 1984. – Т. 18. – С. 65–74.
10. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Подобие в геофизике // Природа. – 1991. – № 1. – С. 13–24.
11. Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И. Ротационные структуры Земной коры. Обзор ВИЭМС. – М., 1990. – 41 с.
12. Гордин В.М., Михайлов В.О. Применение критерия Колмогорова-Винера при решении задач фильтрации и разделения геофизических аномалий // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1977. – № 2. – С. 48–63.
13. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
14. Локтюшин А.А. Экология: Структура и морфология // Деп. в ВИНИТИ 22.7.1999. № 2410-В99. – 314 с.
15. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике // Справочник геофизика: Под ред. В.И. Дмитриева. – М.: Недра, 1982. – 222 с.
16. Сороко Л.М. Основы когерентной оптики и голографии. – М.: Наука, 1973. – 616 с.
17. Марков Н.Г., Ширяев В.Ф. Методические рекомендации по применению принципов голографии в задачах грунтоведения // Методические рекомендации по геофизической голографии. – Томск: Изд-во ИОА СО АН СССР, 1982. – С. 83–92.
18. Защинский Л.А., Ширяев В.Ф., Устинова В.Н. Исследование принципов квазиголографической микроскопии для анализа волновых полей в динамической сейсмике // Методические рекомендации по геофизической голографии. – Томск: Изд-во ИОА СО АН СССР, 1982. – С.138–146.
19. Луговенко В.Н. Статистический анализ аномального магнитного поля. – М.: Наука, 1974. – 200 с.
20. Ярославский А.П. Введение в цифровую обработку изображений. – М.: Советское радио, 1979. – 512 с.
21. Mesko A. Digital filtring applications in geophysical exploration for oil. – Budapest: Academia Kiado, 1984. – 636 p.